基于多重分形的可磨耗涂层相结构表征及高速刮磨行为分析

纪朝辉[1]，张帅[1]，马祥[2]，丁坤英[1]，程涛涛[1]

（1.中国民航大学 天津市民用航空器适航与维修重点实验室，天津 300300；
2.北京飞机维修工程有限公司，北京 100621）

摘 要：目的 研究不同结构铝硅聚苯酯（AlSi-PHB）低温封严涂层中聚苯酯相的分布在高速刮磨条件下与涂层刮削力的关系。**方法** 利用大气等离子喷涂方法制备三种不同结构的 AlSi-PHB 封严涂层，采用扫描电镜和激光共聚焦设备获得涂层截面形貌的金相照片，通过 Matlab 软件得出表征聚苯酯相分布的多重分形谱。采用 UMT-2 微摩擦磨损实验机得到摩擦系数。通过高速转子试验台测得涂层在给定高速刮磨条件下的刮削力，并分析涂层的摩擦磨损机制。**结果** 多重分形谱可以定量表征聚苯酯相的分布及大小颗粒数目比例。三种摩擦副得到的摩擦系数分别为 0.64、0.56、0.55，高速刮磨过程中的刮削力分别为 104、154、90 N。三种涂层都发生了微观切削和粘着磨损的摩擦磨损机制。**结论** 在聚苯酯相含量相差不多的情况下，平均摩擦系数与聚苯酯相含量、分布均匀程度及颗粒大小数目比例有关：聚苯酯含量越多，平均摩擦系数越小；在聚苯酯相含量相差不多的情况下，聚苯酯相分布越均匀，颗粒越细小，摩擦系数越小。同时，聚苯酯相的分布均匀程度会影响高速刮磨过程中的刮削力，聚苯酯相分布越均匀，涂层结合强度越高，刮削力越大，涂层越不容易发生脱落。

关键词：铝硅聚苯酯；封严涂层；多重分形谱；摩擦系数；高速刮磨；刮削力

中图分类号：TG174.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2020)02-0165-07

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.02.020

Phase Structure Characterization and High-speed Scraping Behavior Analysis of Abrasable Coatings Based on Multifractal

JI Zhao-hui[1], *ZHANG Shuai*[1], *MA Xiang*[2], *DING Kun-ying*[1], *CHENG Tao-tao*[1]

(1.Tianjin Key Laboratory for Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2.Ameco, Beijing 100621, China)

ABSTRACT: The work aims to study the relationship between the polystyrene phase distribution of low-temperature seal coatings in AlSi-PHB (aluminum-silicon polyphenylene ester) with different structures and the coating scraping force under high-speed scraping conditions. Three AlSi-PHB seal coatings with different structures were prepared by atmospheric plasma

收稿日期：2019-08-03；**修订日期：**2019-12-27

Received：2019-08-03；**Revised：**2019-12-27

基金项目：国家自然科学基金资助项目（51501222）；中国民航大学实验技术创新基金（2019CXJJ08）

Fund：Supported by the National Natural Science Foundation of China (51501222), Civil Aviation University of China Experimental Technology Innovation Fund (2019CXJJ08)

作者简介：纪朝辉（1963—），男，硕士，教授，主要研究方向为功能涂层。

Biography：JI Zhao-hui (1963—), Male, Master, Professor, Research focus: functional coating.

引文格式：纪朝辉，张帅，马祥，等. 基于多重分形的可磨耗涂层相结构表征及高速刮磨行为分析[J]. 表面技术，2020, 49(2): 165-171.

JI Zhao-hui, ZHANG Shuai, MA Xiang, et al. Phase structure characterization and high-speed scraping behavior analysis of abrasable coatings based on multifractal[J]. Surface technology, 2020, 49(2): 165-171.

spraying method. The metallographic photographs of the cross-section of the coating were measured by scanning electron microscopy and laser confocal equipment. The multi-fractal spectrum of polystyrene phase distribution after characterization was obtained by Matlab software. The friction coefficient was measured by a UMT-2 micro-friction wear tester. The scraping force of the coating under a given high speed scraping condition was measured by a high speed rotor test bench and the friction and wear mechanism of the coating was analyzed. The multifractal spectrum could quantitatively characterize the distribution of polyphenyl ester phase and the proportion of particles in size. The friction coefficients of the three friction pairs were 0.64, 0.56 and 0.55, respectively. The scraping forces during high speed scraping were 104, 154 and 90 N, respectively. The friction and wear mechanisms of micro-cutting and adhesive wear occurred in all three coatings. In the case of similar content of polyphenylene ester phase, the average friction coefficient is related to polyphenyl ester phase content, distribution uniformity and proportion of particle size: the more polyphenyl ester content, the smaller the average friction coefficient. When the content is similar, the distribution of the polyphenyl ester phase is more uniform, the particles become finer, and the friction coefficient is smaller. At the same time, the uniformity of the distribution of polyphenyl ester phase will affect the scraping force during high-speed scraping. The more uniform distribution of polyphenyl ester phase can lead to higher bonding strength of the coating and greater scraping force, so the coating will be less likely to fall off.

KEY WORDS: aluminum silicon polyphenyl ester; sealing coating; multifractal spectrum; friction coefficient; high speed scraping; scraping force

航空发动机压气机及涡轮的机匣与叶片之间存在着防止叶片磨损断裂的可磨耗封严涂层，能起到保护叶片、密封气路、增加推重比、减少油耗、提高效率的作用[1]。封严涂层主要由具有一定硬度、强度的金属相和具有减摩、减震、自润滑作用的非金属相（可磨耗相和孔隙）组成[2]。研究表明，封严涂层原材料、各相配比、显微结构和微观形貌均会影响涂层的力学性能和摩擦系数，进而影响涂层的可磨耗性[3]。近年来，国内多采用进口原材料制备涂层，涂层原材料的各相配比较固定，研究更为成熟。而对于涂层微观结构与涂层摩擦磨损间行为的关系，无论是国内或国外，都研究较少，更多的研究主要集中在涂层孔隙率对涂层可磨耗性能的影响。事实上，相比孔隙率，可磨耗相的分布和颗粒尺寸对封严涂层的摩擦磨损性能影响更大。例如郭文勇[4]在研究镍-石墨可磨耗封严涂层可刮削性与石墨相颗粒大小和分布状态的关系时，统计了石墨相的长度和宽度分布，得出了石墨相越细小、分布越均匀，涂层在摩擦过程中的摩擦系数就越小的结论。刘建明[5]在研究镍基封严涂层中可磨耗相形状对可磨耗性的影响时发现，可磨耗相尺寸不同，使其在不同进给速率下的表现有较大差异。这些研究都采用了数学几何和统计的方法来表征可磨耗相的大小和分布，但是由于涂层可磨耗相形状不规则，分布随机，不具有一般规律性，因此传统的数学几何方法并不准确。

本文引入的多重分形方法可以很好地表征可磨耗相的尺寸大小与分布状态。多重分形能够用来描述几何图形或物理参量在空间的概率分布，常被用于描述具有自相似结构的体系中某些物理量的分布特征，这用其他方法则难以描述[6]。例如刘洋等[7]用多重分形谱来表征球墨铸铁中石墨的分布不均匀性。陈书赢和王海斗等人[8]将概率统计方法、分形方法与数字图像分析技术相结合，研究了孔隙数量、形态、尺寸及其分布等结构特征随喷涂功率的变化。吕建国和高清维等人[9]利用多重分形谱研究发现，随 Au 体积分数的增加，Au-MgF_2 复合薄膜中 Au 颗粒的尺寸会变大，同时 Au 颗粒分布会更为均匀。张俊红等[10]报道，AlSi-PHB 中低温封严涂层耐温可达 320 ℃，可刮磨性良好，能够很好地抵抗砂粒的冲蚀，具有一定的自润滑性，且与钛合金叶片配合良好。在本实验中，将不同的 AlSi-PHB 封严涂层作为研究对象，研究聚苯酯相含量和分布与涂层磨擦磨损性能的关系，并分析高速刮磨过程中，刮削力与涂层可磨耗相之间的联系，为判断不同结构涂层的可磨耗性提供了新思路。

1 实验

1.1 涂层制备

AlSi-ployester 封严涂层基体材料选用低碳钢（45#钢），使用 M3710 大气等离子喷涂设备，在低碳钢基体上喷涂 Ni_5Al（Metco 450NS）粘结底层（底层粉末为瑞士苏尔寿美科公司生产），粘接底层厚度约为 0.1 mm。面层成分为 60%的 AlSi-PHB（Al7Si40 Polyester）混合粉末，如图 1 所示。粉末规格为 11~125 μm。

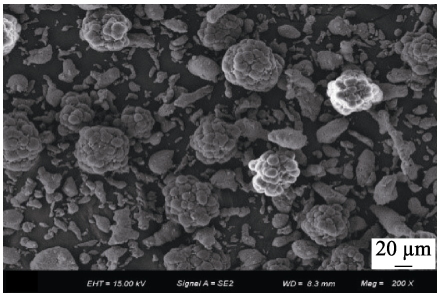


图 1 AlSi-ployester 粉末形貌

Fig.1 AlSi-ployester powder morphology

进行 AlSi-PHB 金相制样时，必须采用真空冷镶嵌工艺镶嵌试样，使用低回复性抛光布和金刚石喷雾抛光液抛光 1 min 后，再用清水抛光 1 min。改变喷涂电压和电流，得到不同结构的 AlSi-PHB 封严涂层。喷涂参数如表 1 所示。

表 1　AlSi-ployester 封严涂层喷涂参数
Tab.1 Spraying parmeters of AlSi-ployester seal coating

Sample	Voltage/ V	Current/ A	Feed rate/ (rad·min^{-1})	Gun movement speed/ (mm·s^{-1})	Distance d/mm
1#	41.7	790	13	300	115
2#	39.4	700	13	300	115
3#	38.6	600	13	300	115

将聚苯酯相设定为考察相，使用扫描电子显微镜观察涂层的截面形貌，并采用 EDS 能谱仪测定组织成分。采用 OLYMPUS 激光共聚焦设备二值分割金相照片，测定聚苯酯相含量，再通过 MATLAB 软件求得聚苯酯相多重分形谱。使用洛氏表面硬度仪测试封严涂层的表面硬度。使用 UMT-2 微摩擦磨损试验机测得涂层与对磨副的摩擦系数变化图。摩擦磨损实验采用往复式接触，对磨副使用钛合金（Ti6Al4V），加载力为 20 N，刮磨长度 10 mm，刮磨时间 60 s，频率 1 Hz。高速刮磨实验采用的是中国民航大学自制的高速转子刮磨实验台，电机驱动升速箱，升速箱带动转盘转动，转盘上安装有钛合金叶片（Ti6Al4V），伺服升降装置调整叶片入侵涂层深度及入侵速率，如图 2 所示。叶片圆周线速度最高可达 220 m/s，进给精度达 0.02 mm。本次实验叶片线速度为 150 m/s，入侵速度为 0.05 mm/s，入侵深度为 1 mm，通过测力传感器测出刮磨过程中的刮削力。为保证实验结果的准确性，测量不同结构封严涂层的摩擦系数和刮削力时，均进行了三次实验。

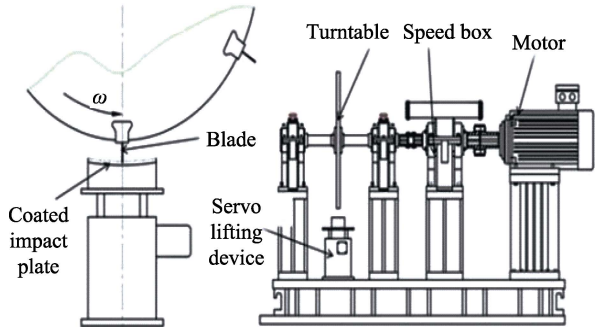


图 2　高速转子刮磨实验台工作原理
Fig.2 Working principle diagram of high speed rotor scraping test bench

1.2　表征聚苯酯相尺寸和分布的多重分形谱计算理论

多重分形谱可以定量表征涂层聚苯酯相分布不均匀程度及颗粒大小数目比例。本文使用盒计数法[11]，并引入概率测度的概念计算得到多重分形谱。简单地说，就是用尺寸不同的正方形网格覆盖要计算的图形，不断减小网格尺度，直到达到图形的最小像素。统计每个盒子（i,j）里面聚苯酯相像素的数目 n_{ij}，然后除以图像中所有聚苯酯相的总数目$\sum n_{ij}$，就是每个小盒子的概率测度 $p_{ij}(p)$：

$$P_{ij}(p)=\frac{n_{ij}}{\sum n_{ij}} \tag{1}$$

概率测度 $p_{ij}(p)$与方格尺寸 p 存在着如下关系：

$$P_{ij}(p)\sim p^{a_{ij}} \tag{2}$$

式中，指数 a_{ij} 是奇异性指数，其取值与盒子在分形图像上的实际位置有关。具有相同 a_{ij} 值的小盒子的数目记做 $N_a(p)$，它与 p 的大小有关，并存在着如下的标度关系：

$$N_a(p)\sim p^{-f(a)} \tag{3}$$

式中，$f(a)$的物理意义是相同 a 值的子集的分形维数。复杂的分形体内部存在着许多个不同 a 值所表示的子集，每一个子集都对应着一个具体的分维 $f(a_{ij})$，一系列的 a_{ij} 对应的 $f(a_{ij})$便构成了一个刻划多重分形性质的维数谱，即为多重分形谱[12]。

这里引入的 a_{ij} 和 $f(a_{ij})$具有十分明确的物理背景，用分形谱宽 Δa 来表征聚苯酯相分布的不均匀程度：Δa 越小，说明聚苯酯相的分布越均匀。用 Δf 来表征聚苯酯相中颗粒尺寸的分布：Δf 为正，证明大颗粒聚苯酯相占主要地位；Δf 为负，说明小颗粒聚苯酯相占主要地位。Δf 同为正数，Δf 越大，大颗粒聚苯酯相数目越多。但 a_{ij} 和 $f(a_{ij})$不能直接用实验测量得出，为此引入第三个可测量来进行计算。

首先定义一个配分函数，其与 $p_{ij}(p)$和 p 存在如下关系：

$$\chi_q(p)=\sum P_{ij}(p)^q=(p)^{\tau(q)} \tag{4}$$

式中，$x_q(\varepsilon)$是配分函数，q 是权重因子，称为质量指数。在计算多重分形谱时，共引入了三个参数，即奇异性标度指数 a。多重分形谱 $f(a_{ij})$和质量指数 $\tau(q)$通过统计物理中的勒让德变换得出。将 a、$f(a_{ij})$和 $\tau(q)$建立联系，有如下的关系式：

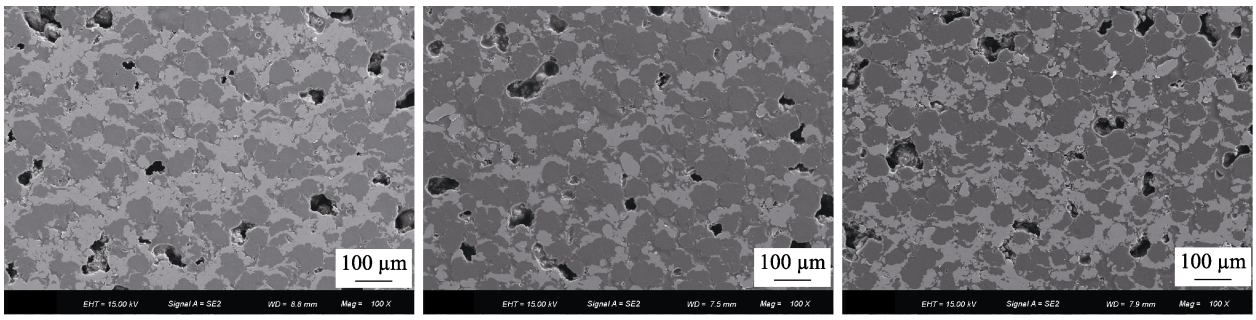
$$\left\{\begin{array}{l}\alpha(q)=\dfrac{\mathrm{d}\tau(q)}{\mathrm{d}(q)}\\ f(\alpha)=q\cdot\alpha(q)-\tau(q)=q\cdot\dfrac{\mathrm{d}\tau(q)}{\mathrm{d}(q)}-\tau(q)\end{array}\right\} \tag{5}$$

通过计算程序测定并计算概率测度 $p_{ij}(p)$、配分函数 $x_q(p)$，便可得到分形结构的多重分形谱 $f(a)$[13]。在实际计算程序中，q 被称为权重因子，取值范围从−∞~+∞，但实际计算时，q 值不可能取无限大[14]。因此可以通过 $f(a)$和 a 随 q 值的增大而趋于饱和值来确定$|q|_{\max}$，本实验中 q 取±6。

2　结果与讨论

2.1　截面形貌结果分析

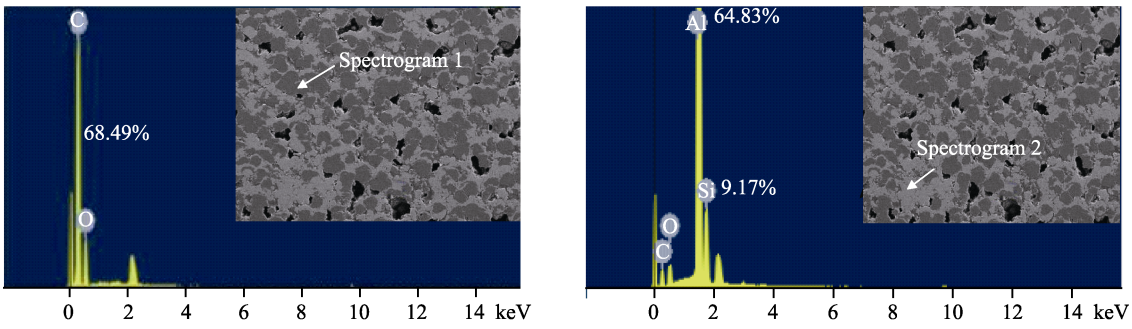
图 3 为三种不同结构的 AlSi-PHB 封严涂层的截面形貌。EDS 测试结果如图 4 所示，白色区域为铝硅金属相，灰色区域是聚苯酯相，黑色区域为孔隙相。综上可得，涂层的截面形貌为铝硅金属包裹着聚苯酯，且它们之间存在着少量的黑色孔隙。表 2 是三种涂层的聚苯酯含量及表面硬度值，聚苯酯的含量随喷涂功率降低而增大。其中，1#、2#和 3#的孔隙率分别为 5.1%、4.3%和 6.6%，孔隙率较低且相差不多，不予考虑。



a 1#　　b 2#　　c 3#

图 3　三种不同结构的铝硅聚苯酯封严涂层截面扫描电镜照片

Fig.3 Scanning electron micrograph of cross-section of aluminum-silicon polyphenylester seal coatings with three different structures



a 黑色聚苯酯相　　b 白色铝硅相

图 4　不同相的 EDS 能谱检测结果

Fig.4 EDS spectrum detection results of different phases: a) black polyphenyl ester phase; b) white aluminum silicon phase

表 2　三种铝硅聚苯酯封严涂层聚苯酯含量和表面硬度值

Tab.2 Polyphenyl ester content and surface hardness of three aluminum-silicon polyphenyl ester seal coatings

AlSi-ploy ester	Polyphenyl ester content/%	Surface hardness (HR15Y)
1#	49.7	39.48
2#	52.4	38.05
3#	54.3	37.88

2.2　多重分形谱表征聚苯酯相分布结果分析

图 5 给出三种不同 AlSi-PHB 封严涂层截面形貌聚苯酯分布的多重分形谱，表 3 为多重分形谱的主要参数（包括 $a_{\min}$、$a_{\max}$、Δa、$f(a_{\min})$、$f(a_{\max})$、Δf、$f(a)_{\max}$）。在截面上选取三个观测点，得出多重分形谱，并计算各个量的平均值。其中分形谱宽 $\Delta a=a_{\max}-a_{\min}=\ln(p_{\max}/p_{\min})/\ln(1/p)$，定量表征了最小、最大聚苯酯概率间的差别，即聚苯酯概率分布的范围，如 Δa 越大，则聚苯酯分布越不均匀。由于 $P_{ij}(\mathrm{p}) \sim p^{a_{ij}}$（其中 $p \leqslant 1$），最大概率子集（$a=a_{\max}$）和最小概率子集（$a=a_{\min}$）对应分形维数的差值为：

$$\Delta f = f(a_{\min}) - f(a_{\max}) = \frac{\ln N_{a_{\max}} - \ln N_{a_{\min}}}{\ln p} = \frac{\ln(N_{P_{\min}} / N_{P_{\max}})}{\ln p} \tag{6}$$

因此，Δf 的大小可以统计最大、最小聚苯酯颗粒数目间的比例[15]。$\Delta f>0$，表明大颗粒聚苯酯占主要地位。

表 3　三种 AlSi-PHB 封严涂层截面多重分形谱的主要参数

Tab.3 Main parameters of multi-fractal spectrum of three AlSi-PHB seal coatings

AlSi-PHB	$a_{\min}$	$a_{\max}$	Δa	$f(a_{\min})$	$f(a_{\max})$	Δf
1#	1.8409	2.4513	0.6104	1.8038	1.3500	0.4538
2#	1.8547	2.4298	0.5751	1.8189	1.3906	0.4283
3#	1.8824	2.5200	0.6376	1.8437	1.2312	0.6125

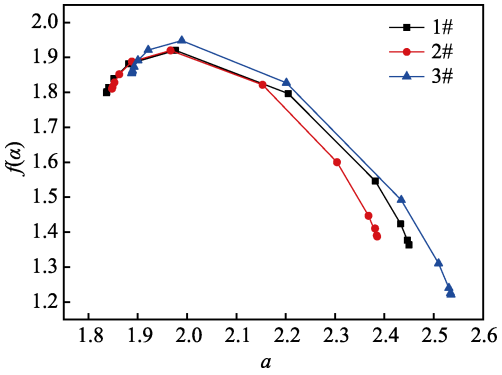


图 5　三种不同结构 AlSi-PHB 封严涂层聚苯酯分布的多重分形谱

Fig.5 Multifractal spectrum of polyphenylene ester distribution in AlSi-PHB seal coatings with different structures

由表 3 可以看出，Δa 的变化规律是 2#<1#<3#。说明 2#试样中的聚苯酯分布最均匀，其次是 1#试样，最后是 3#试样。另外 Δf 都大于 0，即三种试样大颗粒的聚苯酯数目均大于小颗粒的聚苯酯，且 Δf 为 3#>1#>2#，说明 3#试样大颗粒聚苯酯相最多，1#试样次之，2#试样最少。聚苯酯的分布不均匀性和颗粒尺寸分布与聚苯酯含量并无直接关系。本实验中，聚苯酯大尺寸颗粒数目越多，聚苯酯分布越不均匀。

综上所述，多重分形谱可以很好地描述 AlSi-PHB 封严涂层截面聚苯酯颗粒的分布不均匀程度和尺寸分布。Δa 的大小可以表征颗粒分布的不均匀程度，而 Δf 的正负及大小则体现了聚苯酯颗粒尺寸的分布状况。

2.3　摩擦系数结果分析

图 6 是三种试样摩擦磨损后的表面形貌和摩擦磨损过程中摩擦系数的动态变化。从图中可知，摩擦开始时，摩擦系数变动较大，而后逐渐稳定，这说明摩擦副之间在这稳定阶段形成了润滑膜[16]。根据动态

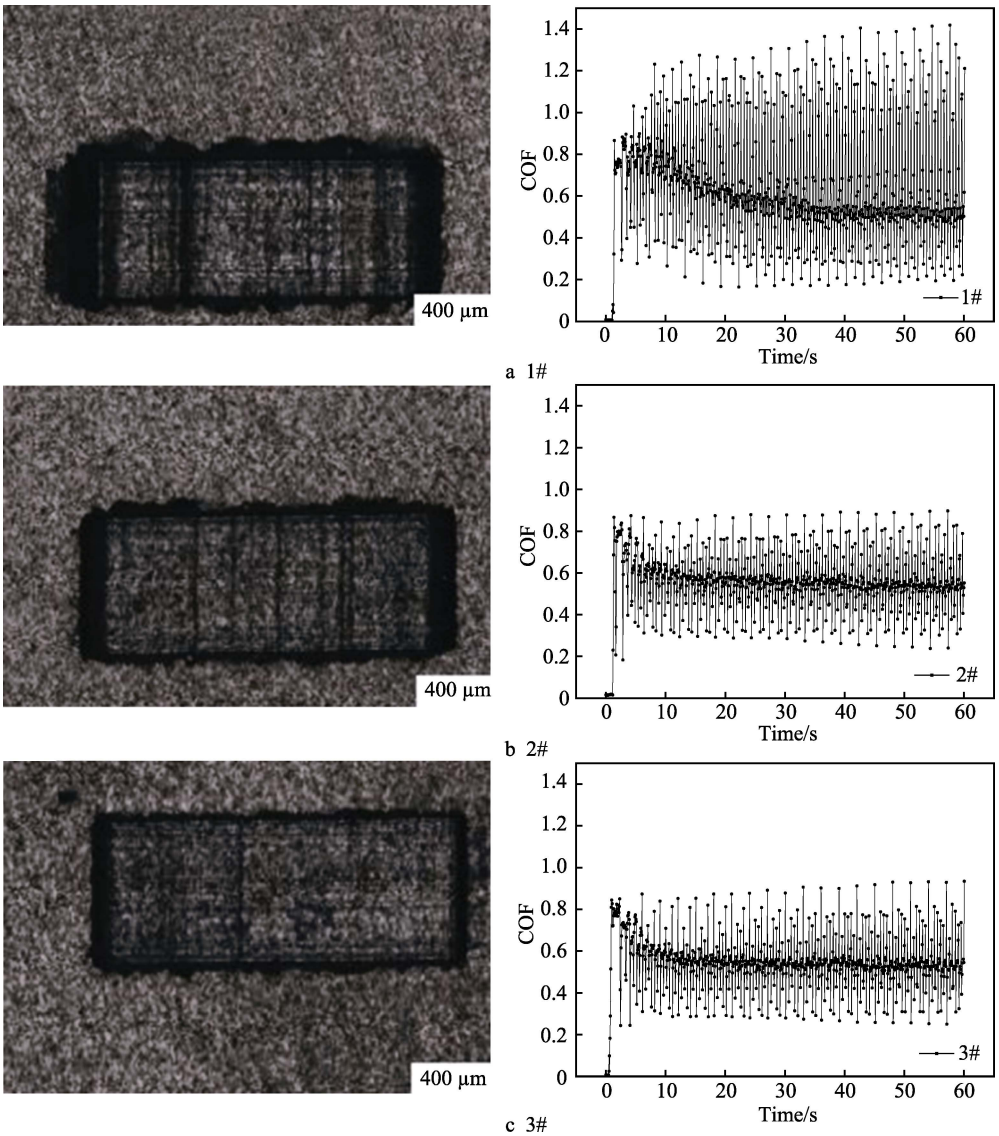


图 6　三种试样动态摩擦系数变化图

Fig.6 Variation of dynamic friction coefficient of three samples

摩擦系数变化图可得，1#、2#和 3#试样的平均摩擦系数分别为 0.64、0.56 和 0.55。在封严涂层的摩擦磨损实验中，聚苯酯相作为减摩相，含量越多，颗粒之间的距离越小，摩擦时聚苯酯成膜性越好[17]，摩擦系数越小。由图 6 可知，平均摩擦系数最小的试样是 3#，最大的是 1#，2#居中。根据表 2、3 数据分析可知，这种现象的出现是因为 3#聚苯酯含量最多，颗粒之间距离最近，在摩擦时聚苯酯更容易连接成膜，因此摩擦系数最小。2#试样聚苯酯含量高于 1#试样且分布最均匀，这是因为小颗粒的聚苯酯含量越多，颗粒越细小，化学动能[18]越大，摩擦时聚苯酯越容易连结成膜，润滑性越好，摩擦系数越低，所以 2#试样的摩擦系数小于 1#试样。

2.4　高速刮磨条件下涂层刮削行为分析

AlSi-PHB 封严涂层结构相当于一个金属蜂窝，铝硅金属相提供硬度和强度。铝硅相含量越多，分布越均匀，涂层内部结合强度越高，越不容易被刮削。图 7 是三种 AlSi-PHB 封严涂层试样在刮磨线速度为 150 m/s、入侵速度为 0.05 mm/s、入侵深度为 1 mm 的高速刮磨条件下的刮削动态变化图。根据图 7 可得，1#、2#和 3#试样的平均刮削力分别为 104、154、90 N。根据表 2 可知，2#试样虽然金属相含量略低于于 1#试样，但相差不多，且聚苯酯相分布更均匀，相应的金属相分布也更加均匀，金属间结合强度相对更强，因此破坏金属间结合力的切向力更大，涂层更不容易被刮削。1#试样相比 3#试样，金属相含量更高，分布更均匀，因此 1#试样切削力大于 3#试样。

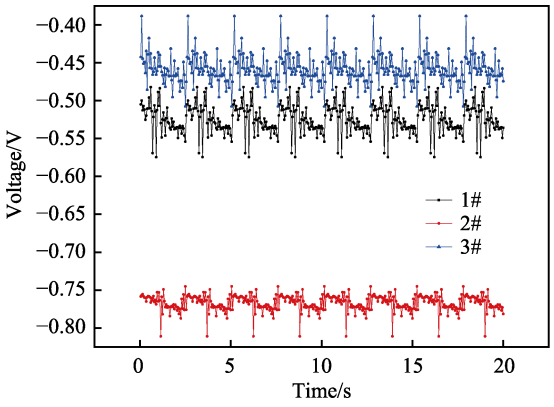
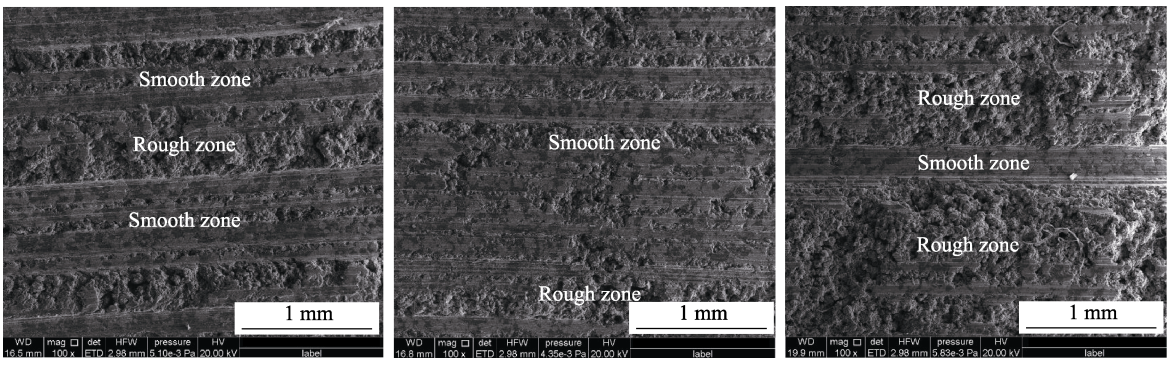


图 7　高速刮磨条件下的 AlSi-PHB 封严涂层刮削力动态变化

Fig.7 Dynamic change of scraping tangential force of AlSi-PHB seal coating under high speed scraping condition

图 8 是三种试样的刮磨表面形貌图，三组不同结构的涂层在相同刮磨条件下的微观结构既有相同之处，也有一定的差异性。相同之处表现为：刮磨表面明显分为沿刮磨方向的光滑区域和粗糙区域。不同的是，三组涂层光滑区域被不同宽度的粗糙区域所隔开。AlSi-PHB 涂层在刮磨试验过程中首先接触的是叶尖微峰，因此三组涂层首先发生的是转子叶片微峰对涂层的微切削作用，即三组涂层均发生了叶尖微峰与涂层之间的二体磨粒磨损[19]，形成了图 8 中的光滑带形貌。并且随着磨损刮磨过程的进行，叶尖微切削作用会导致涂层的脱落，形成粗糙区域。不同结构 AlSi-PHB 涂层的脱落程度不同，其中 3#试样刮磨粗糙区域比例最大，涂层剥落现象最为明显；2#试样刮磨区最为光滑，个别区域有涂层剥落现象；1#试样光滑区和粗糙区比例居中，也有涂层剥落现象。在同样的高速刮磨条件下，三种试样都呈现出微观切削和粘着磨损机制。不同的是，2#试样的粘着磨损效应最小，这是因为聚苯酯在金属网的包裹下分布最均匀，涂层本身结合强度最高，所受刮削应力较为均匀，呈现出“硬而不粘”的效果，因此所需刮削力最大，涂层脱落最少。3#试样各相分布最不均匀，聚苯酯相含量多，且大尺寸数目较多，涂层内部结合力弱，易被刮削，容易发生粘着磨损。



a 1#　　b 2#　　c 3#

图 8　涂层高速刮磨后的表面形貌

Fig.8 Surface topography of coating after high speed scraping

3　结论

1）利用多重分形谱可以表征 AlSi-PHB 封严涂层中聚苯酯相的分布。其中，多重分形谱的谱宽 Δa 可以定量表征聚苯酯相分布的不均匀程度，Δf 可以表征大颗粒和小颗粒间数目比例。聚苯酯的分布不均匀程

度与聚苯酯含量并无直接联系，聚苯酯含量会随喷涂功率升高而降低。

2）AlSi-PHB 封严涂层与钛合金对磨副之间的摩擦系数大小与聚苯酯相含量、分布和颗粒尺寸有关。聚苯酯含量越多，距离越近，聚苯酯相越容易连接成膜，摩擦系数越小。在聚苯酯含量相差不多的情况下，聚苯酯相分布越均匀，颗粒越细小，摩擦系数越小。

3）三种试样的切削力大小与聚苯酯相的分布均匀程度相关。在聚苯酯含量相差不多的情况下，聚苯酯相分布越均匀，涂层内部结合强度越高，涂层越不容易被刮削，越不容易发生脱落。

参考文献：

[1] XUE Wei-hai, GAO Si-yang, DUAN De-li, et al. Effects of blade material characteristics on the high-speed rubbing behavior between Al-hBN abradable seal coatings and blades[J]. Wear, 2018, 410-411: 25-33.

[2] IRISSOU E, DADOUCHE A, LIMA R S. Tribological characterization of plasma-sprayed CoNiCrAlY-BN abradable coatings[J]. Journal of thermal spray technology, 2014, 23(1-2): 252-261.

[3] WANG B, YANG Z, ZHOU D M, et al. Microstructure and wearability of surface coating of Fe-Based amorphous core welding rod[J]. Advanced materials research, 2010, 154-155: 1384-1388.

[4] 郭文勇, 丁飞, 唐健江, 等. 石墨相尺寸与分布对镍-石墨可磨耗封严涂层摩擦学性能影响[J]. 风机技术, 2018, 60(2): 71-76.
GUO Wen-yong, DING Fei, TANG Jian-jiang, et al. Effect of graphite phase size and distribution on the tribological properties of nickel-graphite abradable sealant coatings[J]. Fan technology, 2018, 60(2): 71-76.

[5] 刘建明, 于月光, 刘通, 等. 可磨耗相尺寸对脆性断裂机制封严涂层可磨耗性的影响研究[J]. 热喷涂技术, 2018, 10(4): 47-51, 62.
LIU Jian-ming, YU Yue-guang, LIU Tong, et al. Study on the effect of wearable phase size on the wearability of sealant coating with brittle fracture mechanism[J]. Thermal spray technology, 2018, 10(4): 47-51, 62.

[6] 郝强. 基于多重分形广义维数的 SAR 图像边缘检测[J]. 计算机时代, 2017(6): 36-39.
HAO Qiang. SAR image edge detection based on multifractal generalized dimension[J]. Journal of computer age, 2017(6): 36-39.

[7] 刘洋, 杨弋涛, 姜磊, 等. 基于多重分形理论的球铁石墨颗粒分散均匀性的分析[J]. 铸造, 2007(2): 167-169, 176.
LIU Yang, YANG Yi-tao, JIANG Lei, et al. Analysis of dispersion uniformity of ductile iron graphite particles based on multifractal theory[J]. Foundry, 2007(2): 167-169, 176.

[8] 陈书赢, 王海斗, 马国政, 等. 等离子喷涂层原生性孔隙几何结构的分形及统计特性[J]. 物理学报, 2015, 64(24): 101-108.
CHEN Shu-ying, WANG Hai-dou, MA Guo-zheng, et al. Fractal and statistical properties of the original pore geometry of plasma sprayed coatings[J]. Acta physica sinica, 2015, 64(24): 101-108.

[9] 吕建国, 高清维, 蔡琪, 等. Au-MgF_2 复合薄膜非规则微结构的多重分形表征[J]. 功能材料, 2006(11): 1709-1711, 1715.
LV Jian-guo, GAO Qing-wei, CAI Qi, et al. Multifractal characterization of irregular microstructure of Au-MgF_2 composite film[J]. Journal of functional materials, 2006(11): 1709-1711, 1715.

[10] 张俊红, 王杰, 鲁鑫, 等. 考虑封严涂层的航空发动机叶片碰摩过程[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(5): 980-987.
ZHANG Jun-hong, WANG Jie, LU Xin, et al. Rubbing process of aero-engine blades considering seal coating[J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2018, 52(5): 980-987.

[11] 陈亚军, 邹慧, 王志平, 等. 等离子喷涂 AlSi-ployester 封严涂层工艺优化研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(2): 79-82.
CHEN Ya-jun, ZOU Hui, WANG Zhi-ping, et al. Optimization of plasma sprayed AlSi-ployester sealing coating process[J]. Hot working technology, 2010, 39(2): 79-82.

[12] 曹俊贤, 宋春林. 分形维数的计算及改进[J]. 信息技术与信息化, 2017(10): 19-23.
CAO Jun-xian, SONG Chun-lin. Calculation and improvement of fractal dimension[J]. Information technology and informatization, 2017(10): 19-23.

[13] 李彤. 多重分形原理及其若干应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
LI Tong. Multifractal principle and its applications[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.

[14] 李平, 胡可乐, 汪秉宏. 多重分形谱在材料分析中的应用研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2004(1): 77-81.
LI Ping, HU Ke-le, WANG Bing-hong. Application of multifractal spectrum in material analysis[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004(1): 77-81.

[15] 王祖林, 周荫清. 多重分形谱及其计算[J]. 北京航空航天大学学报, 2000(3): 256-258.
WANG Zu-lin, ZHOU Yin-qing. Multifractal spectrum and its calculation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000(3): 256-258.

[16] LIU C H, DING C H. Microstructure and tribological characterizations of Ni-based self-lubricating coating[J]. Wear, 2010, 268(3-4): 599-604.

[17] TANG J J, LIU K, YANG Q Z, et al. The influence of size and distribution of graphite on the friction and wear behavior of Ni-graphite coatings[J]. Surface and coatings technology, 2014, 252: 48-55.

[18] DING C H, LIU C H, YANG Z M, et al. Effect of size refinement and distribution of lubricants on friction coefficient of high temperature self-lubricating composites[J]. Composites science and technology, 2010, 70(6): 1000-1005.

[19] 刘正发, 温凤春, 王铮, 等. 叶片转速对铝硅聚苯酯涂层刮磨性能的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(9): 112-117.
LIU Zheng-fa, WEN Feng-chun, WANG Zheng, et al. Effect of blade rotational speed on the scratch properties of Al-Si polyphenyl ester coatings[J]. Surface technology, 2016, 45(9): 112-117.